

А. А. Орлов*, О. З. Пожого, Е. А. Касимова

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
г. Москва

**lxg2494@yandex.ru*

Научный руководитель – проф., д-р техн. наук *С. В. Скворцова*

ВЛИЯНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ ВОДОРОДОМ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ФАЗОВОГО СОСТАВА СПЛАВА НА ОСНОВЕ Ti_2AlNb

В работе проводилось исследование влияния легирования водородом на структуру и фазовый состав сплава на основе интерметаллида Ti_2AlNb при различных температурах нагрева. Установлены температурные интервалы существования фазовых областей в орто-сплаве.

Ключевые слова: жаропрочный титановый сплав, интерметаллид Ti_2AlNb , термоводородная обработка, фазовый состав, структура.

A. A. Orlov, O. Z. Pozhoga, E. A. Kasimova

EFFECT OF ADDITIONAL HYDROGEN ALLOYING ON STRUCTURE AND PHASE COMPOSITION FORMATION IN Ti_2AlNb BASED ALLOY

Effect of hydrogen alloying on structure and phase composition in Ti_2AlNb based alloy is studied at different heating temperatures. Temperature ranges of the phase regions in the orthorhombic alloy are determined.

Keywords: heat-resistant titanium alloy, Ti_2AlNb intermetallic, thermo-hydrogen processing, phase composition, structure.

Применение орторомбических сплавов титана на основе Ti_2AlNb для изготовления изделий авиационной техники в настоящее время ограничено в связи со сложностями, с которыми сталкиваются технологи при получении и обработке таких материалов. Помимо сложностей в металлургическом производстве, невысокая технологичность орто-сплавов при обработке давлением затрудняет получение полуфабрикатов с гарантированным уровнем свойств и требует применения высокомоощного оборудования [1–3]. Исследования, посвященные легированию титановых сплавов водородом, показали, что введение водорода благоприятно сказывается на технологической пластичности сплавов, что способствует эффективному процессу пластической деформации при более низких температурах обработки [4, 5]. Поэтому изучение влияния водорода на структуру и свойства орто-сплавов является актуальной задачей, так как данные сплавы, обладающие более высокими удельными прочностными

свойствами, могут заменить жаропрочные стали для изготовления деталей, работающих при температурах до 650–700°C.

В работе проводилось исследование влияния дополнительного легирования водородом на температуру полиморфного превращения ($T_{пп}$), структуру и фазовый состав сплава на основе интерметаллида Ti_2AlNb .

Исследования проводили на образцах, вырезанных из прутка диаметром 60 мм сплава марки ВТИ-4 ($Ti-12Al-41,2Nb-0,89Mo-0,83V-1,27Zr-0,13Si, \%$ (здесь и далее % по массе)). Пруток получен по опытно-промышленной технологии из слитка, выплавленного тройным вакуумно-дуговым переплавом с расходуемым электродом с последующей ковкой в β - и ($\beta+O$)-областях и горячей прокаткой.

Исследования структуры и фазового состава образцов проводили с помощью металлографического и рентгеноструктурного фазового анализа (РСФА), а определение $T_{пп}$ осуществлялось методом пробных закалок.

Наводороживающий отжиг проводили в среде молекулярного водорода в установке Сиверта до концентраций 0,1; 0,2; 0,3 и 0,4 % при температурах 900–950°C. Из проведенных ранее исследований [4, 6] известно, что при легировании титановых сплавов водородом происходит снижение диффузии основных легирующих элементов, поэтому с повышением концентрации вводимого водорода увеличивалась продолжительность наводороживающего отжига.

Структура исходного полуфабриката представлена мелкодисперсной смесью β - и O -фаз (рис. 1).

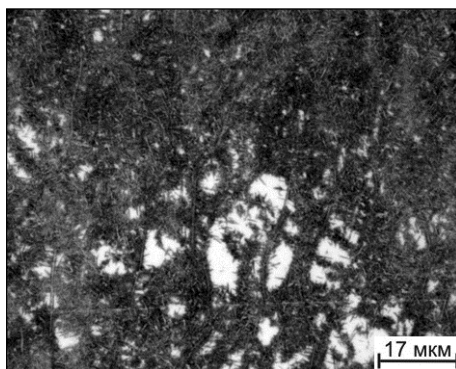


Рис. 1. Микроструктура прутка из сплава ВТИ-4 в исходном горячекатаном состоянии

После легирования сплава 0,1 и 0,2 % водорода фазовый состав также представлен β - и O -фазами, распределение частиц O -фазы в объеме β -зерна после наводороживающего отжига становится более однородным (рис. 2, а, б). С повышением концентрации водорода происходит уменьшение объемной доли β -фазы, при этом параметр a_β увеличивается с 0,3240 до 0,3317 нм, а атомный объем увеличивается более чем на 7 % с 0,0170 до 0,0183 нм³, что свидетельствует о растворении большего количества водорода в решетке β -фазы. Оставшаяся часть водорода

растворена в О-фазе, о чем можно судить по увеличению ее атомного объема, изменение которого составляет небольшую величину – 1,8 %.

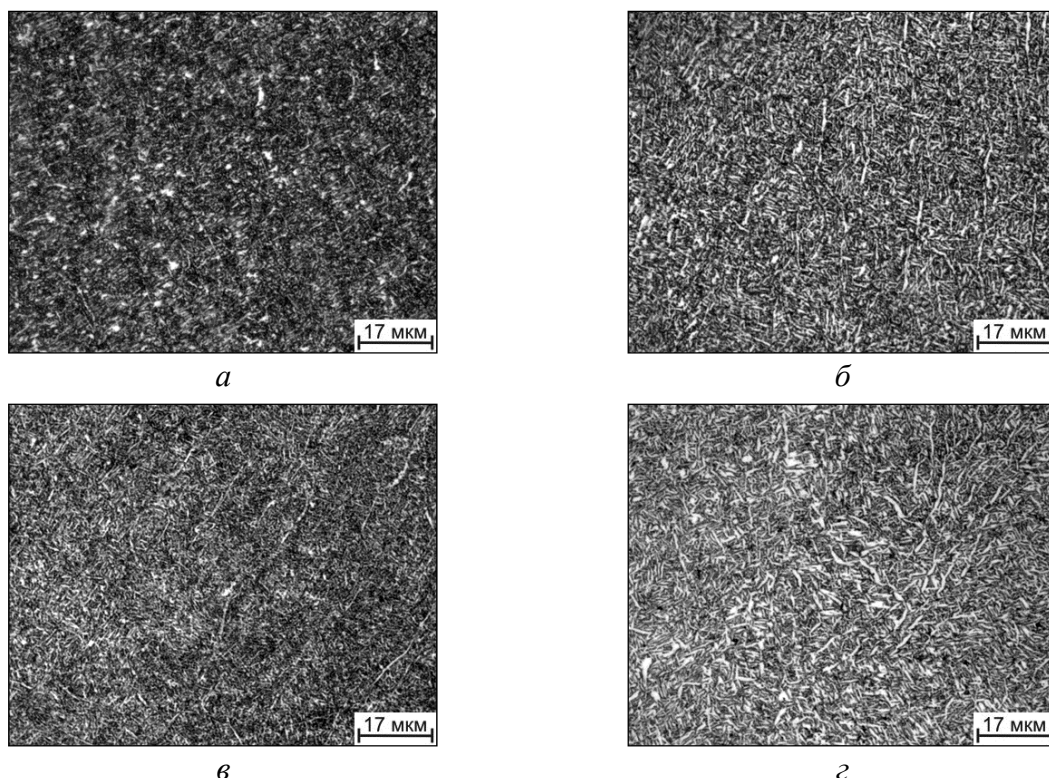


Рис. 2. Микроструктура прутка из сплава ВТИ-4 с различным содержанием водорода:
а – 0,1 % Н; *б* – 0,2 % Н; *в* – 0,3 % Н; *г* – 0,4 % Н

При введении в сплав 0,3 и 0,4 % водорода РСФА не показал наличия в структуре сплава β -фазы, а атомный объем О-фазы увеличивается с $0,0167 \text{ нм}^3$ для сплава с исходным содержанием водорода до $0,0172 \text{ нм}^3$ для сплава с 0,4 % водорода. В микроструктуре образца с содержанием водорода 0,4 % наблюдается некоторое укрупнение пластин О-фазы по сравнению с образцами с меньшим содержанием водорода (рис. 2, *г*), что, по-видимому, связано с протеканием коалесценции из-за более длительной выдержки при повышенных температурах в процессе наводороживания сплава и последующего охлаждения.

На следующем этапе работы определяли температуру полиморфного превращения методом пробных закалок. Сначала закалку проводили в интервале температур $1250\text{--}800^\circ\text{C}$ с шагом 50°C , затем разбивали определённые интервалы на $10\text{--}20^\circ\text{C}$ для более точного анализа. Время выдержки при нагреве под закалку составило от 30 минут до 4 часов в зависимости от температуры.

Установлено, что сплав ВТИ-4 без водорода при температурах выше 1045°C является однофазным и представлен упорядоченным β -твердым раствором ($B2$ -фаза). При понижении температуры в сплаве образуется О-фаза, при этом происходит разупорядочение β -фазы. Температура

$B2/(\beta + O)$ перехода в сплаве, легированном 0,1 % Н, понижается и составляет 990 °С. В сплаве, содержащем 0,2 % Н, температура перехода в однофазную область составляет 1070 °С, а при более низких температурах в сплаве образуется α_2 -фаза, и структура сплава становится трехфазной ($\beta + O + \alpha_2$). С увеличением содержания водорода $T_{пп}$ увеличивается до 1140 и 1165 °С для сплавов с 0,3 и 0,4 % Н, соответственно.

При снижении температуры нагрева до 800 °С сплав с исходным содержанием водорода и легированный 0,1 % Н остается двухфазным ($\beta + O$) (табл.). В сплаве с 0,2 % Н структура представлена тремя фазами ($\beta + O + \alpha_2$) в температурном интервале 900–1050 °С. Понижение температуры до 850 °С приводит к исчезновению отражений от α_2 -фазы, и в температурном интервале 800–850 °С сплав является двухфазным – ($\beta + O$). В сплаве, содержащем 0,3 % Н, трехфазная ($\beta + O + \alpha_2$) структура сохраняется во всем интервале температур от 1140 до 800 °С. С понижением температуры нагрева до 850 °С в сплаве с 0,4 % Н происходит изменение количественного соотношения фаз в сторону уменьшения количества β -фазы и увеличения доли интерметаллидных фаз, а при температуре 800 °С структура сплава является двухфазной ($O + \alpha_2$), отражений от β -фазы обнаружено не было.

Таблица

Фазовый состав сплава ВТИ-4 с различным содержанием водорода
в зависимости от температуры нагрева под закалку

Т, °С	Содержание водорода, масс. %				
	0,006	0,1	0,2	0,3	0,4
1200	B2	B2	B2	B2	B2 $\beta+(\alpha_2)^*$
1150	B2	B2	B2	B2	$\beta+(O+\alpha_2)^*$
1100	B2	B2	B2	$\beta+(\alpha_2)^*$	$\beta+(O+\alpha_2)^*$
			$\beta+(\alpha_2)^*$	$\beta+(O+\alpha_2)^*$	
1050	B2	B2	$\beta+(O+\alpha_2)^*$	$\beta+O+\alpha_2$	$\beta+O+\alpha_2$
1000	$\beta+O$	B2	$\beta+(O+\alpha_2)^*$	$\beta+O+\alpha_2$	$\beta+O+\alpha_2$
950	$\beta+O$	$\beta+O$	$\beta+O+\alpha_2$	$\beta+O+\alpha_2$	$\beta+O+\alpha_2$
900	$\beta+O$	$\beta+O$	$\beta+O+\alpha_2$	$\beta+O+\alpha_2$	$\beta+O+\alpha_2$
850	$\beta+O$	$\beta+O$	$\beta+O$	$\beta+O+\alpha_2$	$\beta+O+\alpha_2$
800	$\beta+O$	$\beta+O$	$\beta+O$	$\beta+O+(\alpha_2)^*$	$O+\alpha_2$

* в скобках указаны фазы, представленные в сплаве в небольшом количестве

Снижение температуры нагрева сопровождается увеличением параметров решеток и атомных объемов β -, O- и α_2 -фаз, причем для β -фазы это изменение более значительно, что свидетельствует о растворении большей части водорода в ее решетке.

Таким образом, проведенные исследования показали, что после наводороживающего отжига с увеличением содержания водорода от исходного (0,006 %) до 0,2 % уменьшается объемная доля β -фазы, а структура сплава ВТИ-4 с 0,3 и 0,4 % Н представлена только О-фазой. При исследовании влияния температуры нагрева под закалку на изменение фазового состава и структуры сплава ВТИ-4 установлено, что дополнительное легирование водородом сплава способствует появлению α_2 -фазы и повышению стабильности О-фазы вследствие снижения термодинамической устойчивости В2-фазы, приводя к ее разупорядочению в процессе фазовых превращений при снижении температуры нагрева.

Работа выполнена на оборудовании ресурсного центра коллективного пользования «Авиационно-космические материалы и технологии» МАИ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Titanium and Titanium Alloys. Fundamentals and Applications / edited by Christoph Leyens, Manfred Peters // WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. 2003. P. 514.
2. Полькин И. С. Интерметаллиды на основе титана / И. С. Полькин, О. Н. Гребенюк, В. С. Саленков // Технология легких сплавов. 2010. № 2. С. 5–15.
3. Состояние, проблемы и перспективы создания жаропрочных титановых сплавов для деталей ГТД / О. С. Кашапов [и др.] // Труды ВИАМ. 2013. № 3. URL: http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=20.
4. Водородная технология титановых сплавов / А. А. Ильин [и др.]. Москва : МИСиС, 2002. 392 с.
5. Ильин А. А. Механизм и кинетика фазовых и структурных превращений в титановых сплавах / А. А. Ильин. Москва : Наука, 1994. 304 с.
6. О влиянии водорода на диффузионную подвижность атомов металлической подрешетки β -фазы титановых сплавов / А. А. Ильин [и др.] // Металлы. 1994. № 5. С. 99–103.